МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 621.317.6 DOI 10.12737/18132

Численное моделирование эксперимента по импульсному воздействию на пьезоэлектрический генератор стекового типа*

А. Н. Соловьев[1], Ле Ван Зыонг[2], В. А. Акопьян[3], Е. В. Рожков[4], В. А. Чебаненко[5]**

[1, 2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[1, 3, 4, 5] Южный федеральный университет, ИММ и КН им. И. И. Воровича, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[1] Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Numerical simulation of the experiment on pulsed excitation of stack type piezoelectric generator***

A. N. Solovyev[1], Le Van Duong[2], V. A. Akopyan[3], E. V. Rozhkov[4], V. A. Chebanenko[5]**

[1, 2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[1, 3, 4, 5] Southern Federal University, Research Institute for Mechanics and Applied Mathematics after I.I. Vorovich, Rostov-on-Don, Russian Federation
[1] Southern Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don, Russian Federation.

Описаны результаты численного моделирования натурного эксперимента низкочастотного импульсного воздействия на пьезоэлектрический генератор (ПЭГ) стекового типа для устройства накопления энергии. ПЭГ представляет собой многослойный осесимметричный пьезокерамический пакет. Разработана конечно-элементная модель устройства в *ANSYS* и проанализирована аналитическая упрощенная одномерная модель. Исследована зависимость выходного напряжения от величины активной нагрузки при гармоническом и нестационарном механическом воздействии на ПЭГ. Сопоставление экспериментальных результатов и численного расчета показало их хорошую сходимость, что позволяет использовать разработанные численные модели для оптимизации конструкции ПЭГ при заданных частоте внешнего воздействия и величине активного сопротивления внешней электрической цепи. Кроме того, установлено, что частотная зависимость выходного напряжения ПЭГ осевого типа имеет сложный характер, зависящий как от уровня сжимающей импульсной нагрузки и величины пьезомодуля материала чувствительного элемента ПЭГ, так и от электрического сопротивления нагрузки.

The numerical modeling results of the full-scale experiment with low-frequency pulse excitation of the stack-type piezoelectric generator (PEG) for the energy storage device are described. PEG is a multilayer axisymmetric piezoceramic package. The dependence of the output voltage on the active load rate under the harmonic and non-stationary mechanical action of the PEG is studied. A finite element device model is developed in *ANSYS*, and a simplified one-dimensional analytical model is analyzed. The experimental results-to-numerical calculation correlation has shown their good convergence which allows using the analyzed numerical models to optimize the PEG design at the given external action frequency and active resistance value of the external electric circuit. In addition, it is found that the frequency dependence of the output voltage of the axial-type PEG is of a complex nature depending both on the compressive pulse loading level and the piezoelectric modulus value of the PEG sensitive element, and on the electrical load resistance.

Ключевые слова: многослойный пьезоэлектрический генератор, выходные характеристики, физический эксперимент, конечно-элементный расчет, упрощенная модель.

Keywords: multilayered piezoelectric generator, output characteristics, physical experiment, finite element calculation, simplified model.

Введение. В последние годы получили развитие исследования, посвященные разработке пьезоэлектрических преобразователей механической энергии колебаний объектов в электрическую. Наиболее известны пьезоэлектрические преобразователи энергии двух конфигураций: осевого (стекового) и кантилеверного типа, которые имеют неограниченный срок эксплуатации, если внешние механические и температурные воздействия не приводят к необратимому уменьшению поляризации их активных элементов или их разрушению [1–3]. Большинство из этих работ посвя-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-01-00943, 13-08-00754) и Южного федерального университета (тема № 213.01-2014/03ВГ).
** E-mail: solovievarc@gmail.com, vchebanenko@sfedu.ru
*** The research is done with the financial support from RFFI (grants nos. 13-01-00943, 13-08-00754) and Southern Federal University (theme no. 213.01-2014/03ВГ).

щены изучению характеристик пьезоэлектрических генераторов (ПЭГ) кантилеверного типа («мода колебаний d_{31}»). ПЭГ осевого типа исследованы в меньшей степени. В частности, известны работы, в которых приведены результаты теоретических исследований характеристик ПЭГ, работающих на «продольной моде d_{33} колебаний» [3, 4]. Работы [4–7] посвящены построению моделей ПЭГ на основе колебаний механической системы с сосредоточенными параметрами. Использование таких систем является удобным модельным подходом, так как позволяет получить аналитические зависимости между выходными параметрами ПЭГ (потенциалом, мощностью и т.п.) и электрическими, механическими характеристиками и сопротивлением внешней электрической цепи, однако, как показано в [8] диапазон их применения весьма ограничен. Более полные результаты исследований многослойных ПЭГ осевого типа приведены также в других работах [10, 11]. В них описаны результаты исследований характеристик ПЭГ, как осевого, так и кантилеверного типов. В [10] приведены интересные результаты температурных зависимостей параметров ПЭГ с чувствительным элементом (ЧЭ) из сегнетомягкой пьезокерамики ПКР–46. К сожалению, константы этого состава пьезокерамики не приведены, а это не позволяет провести сравнительный анализ достоверности измеренных параметров ПЭГ с известными, описанными, например, в [9]. В обзоре [11], опубликованном позднее, описаны области применения маломощных ПЭГ в основном кантилеверного типа с присоединенной массой. Также приведены только общие данные о разработанных за рубежом ПЭГ осевого типа, в которых используется механическая энергия при движении человека, т.е. в режиме циклических нагрузок. Более подробных данных о результатах исследований таких ПЭГ, к сожалению, не приведено. Выбор импульсного режима нагружения обусловлен областью применения ПЭГ осевого типа в качестве перспективных автономных источников энергии, преобразующих механическую энергию периодических воздействий из внешней среды, в том числе не гармонических, в электрическую. В частности, эти ПЭГ могут быть использованы для преобразования механической энергии колебаний рельсов железнодорожного транспорта или дорожного полотна автодороги в электрическую энергию.

Приведенный выше краткий анализ известных работ показал, что задача создания ПЭГ осевого типа большой мощности с эффективными выходными параметрами при действии импульсных нагрузок в полном объеме пока не решена, хотя и достаточно актуальна. Авторами получены экспериментальные и численные результаты исследований временных зависимостей выходных характеристик многослойного пьезоэлектрического генератора осевого типа от величины импульсных механических сжимающих напряжений при различных значениях электрического сопротивления нагрузки.

Объект исследования и методика эксперимента. Приведем результаты исследований характеристик одной модели многослойного ПЭГ стекового типа. Его ЧЭ состоит из 11 параллельно соединенных пьезоэлементов (ПЭ) дискового типа каждый толщиной 1 мм с внешним и внутренним диаметром 18 и 8 мм, соответственно. Общая высота ЧЭ составляет 11,3 мм, а общая электрическая емкость 20,22 нФ. При этом каждый из ПЭ поляризован по толщине, в качестве материала ЧЭ была использована пьезокерамика ЦТС-19, материальные константы которой приведены в таблице 1.

Таблица 1

Материальные константы пьезокерамики ЦТС-19:

c_{11}^E, ГПа	c_{12}^E, ГПа	c_{13}^E, ГПа	c_{33}^E, ГПа	c_{44}^E, ГПа	e_{31}, Кл/м^2	e_{33}, Кл/м^2	e_{15}, Кл/м^2	$\varepsilon_{11}/\varepsilon_0$ -	$\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$ -
109	61	54	93	24	-4.9	14.9	10.6	820	840

Испытание ПЭГ производились на лабораторной установке импульсного нагружения ПЭГ, работающих на продольных колебаниях. Структурная схема установки представлена на рис. 1.

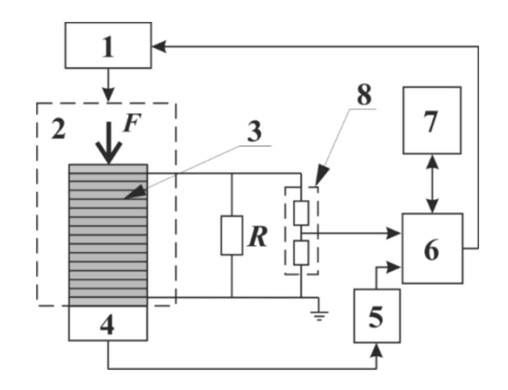


Рис. 1. Структурная схема испытательного стенда. 1 — частотный преобразователь; 2 — нагружающий модуль; 3 — испытуемый образец многослойного пьезопреобразователя (ПЭГ осевого типа); 4 — тензометрический динамометр; 5 — тензоусилитель; 6 — АЦП/ЦАП; 7 — персональный компьютер с установленным ПО PowerGraph; 8 — делитель напряжения; *R* — сопротивление электрической нагрузки

На рис. 2 приведена фотография нагружающего модуля испытательной установки, размещенной на общем основании, справа вверху — фотография ЧЭ (аппаратная часть стенда не показана).

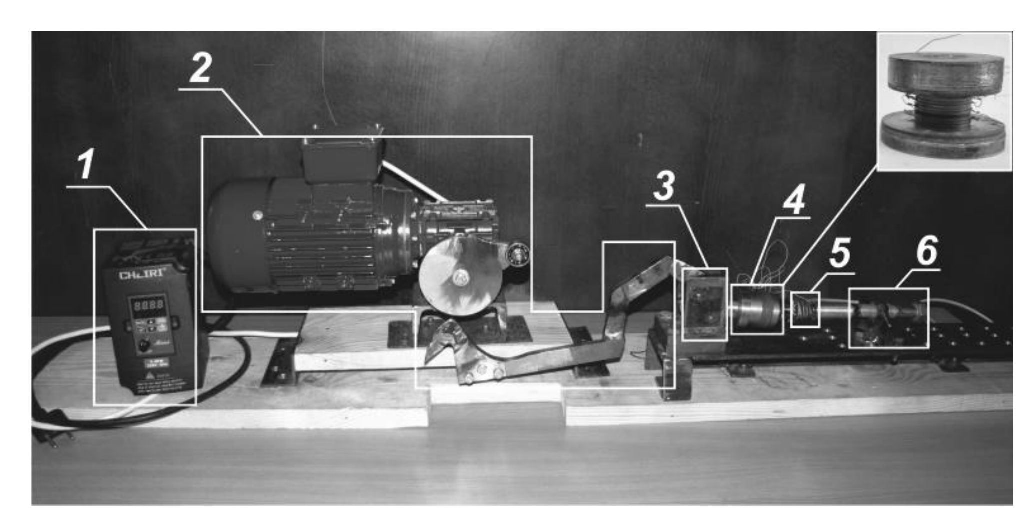


Рис. 2. Фотография лабораторной силовой части испытательной установки для определения характеристик ПЭГ осевого типа. 1 — частотный преобразователь, задающий частоту вращения двигателя от 10 до 1400 об/мин; 2 — двигатель с редуктором и эксцентриковым диском, и шатуном; 3 — механический рычажный усилитель изменения сжимающего усилия с коэффициентом преобразования 50; 4 — испытуемый образец ПЭГ; 5 — тензометрический динамометр; 6 — опорный кронштейн

Образец подвергался механическому циклическому нагружению при сжимающей импульсной силе с амплитудой от 1 кН и до 4 кН. Для каждого цикла сжимающего усилия, измеряемого с помощью динамометра, регистрировались временные зависимости величины сжимающей силы и выходного напряжения пьезогенератора при различных дискретных значениях нагрузочного сопротивления *R* от 10 кОм до 22 мОм. Регистрация временных зависимостей характеристик ПЭГ проводилась с учетом влияния сопротивления нагрузки на форму импульсов выходного напряжения ПЭГ. Такое влияние характеризуется «степенью неискаженности передачи электрического сигнала», а в нашем случае пьезоэлектрического отклика ЧЭ. Как известно [12], режим неискаженной передачи электрического импульса на регистратор сигнала определяется соотношением

$$RC \geq \tau ,$$

где τ — длительность импульса сжимающего усилия; *R* — сопротивление электрической нагрузки; *C* — электрическая емкость активного элемента ПЭГ.

Результаты экспериментальных измерений. По результатам экспериментальных измерений получены сопряженные временные зависимости силового механического воздействия и выходного электрического напряжения испытуемой модели ПЭГ от величины механического усилия и электрического нагрузочного сопротивления *R*.

На рис. 3 показаны сопряженные временные зависимости воздействующего сжимающего механического импульса силой амплитудой до 3,1 кН (кривая 4) и соответствующих пьезоэлектрических откликов на выходе ПЭГ при различных значениях сопротивлениях нагрузки *R*: 0,374; 2,572 и 22,77 МОм (кривые 1, 2 и 3).

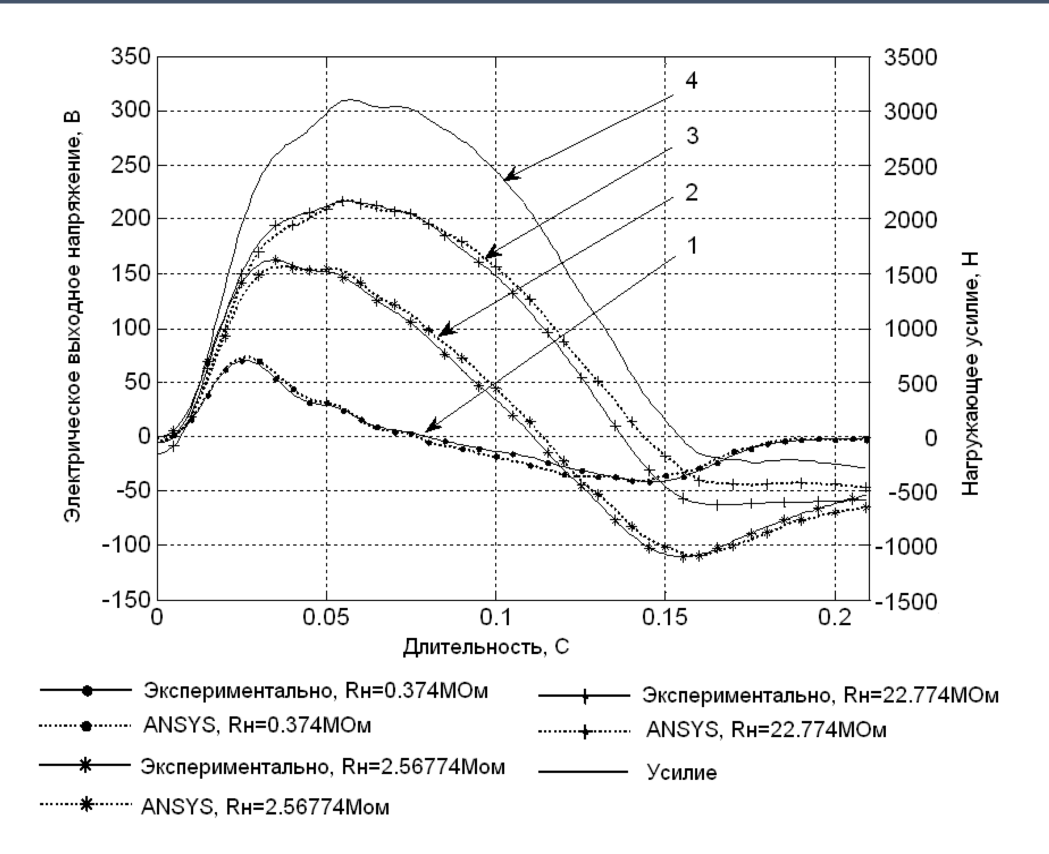


Рис. 3. Временные зависимости воздействующего сжимающего механического импульса величиной силы амплитудой до 3,1 кН (кривая 4) и соответствующих пьезоэлектрических откликов на выходе ПЭГ при различных значениях сопротивлениях нагрузки *R*: 0,374; 2,572 и 22,77 МОм (кривые 1, 2 и 3) соответственно, полученные из физического эксперимента (сплошные линии) и численного конечно-элементного расчета (пунктирные линии)

Сравнение форм сигналов пьезоэлектрического отклика при различных значениях *R* (кривые 1, 2, 3) и импульса усилия сжатия (кривая 4) показало, что с ростом *R* формы выходного напряжения стремятся к форме возбуждающего импульса механического напряжения.

Конечно-элементное моделирование. В *ANSYS* была построена осесимметричная конечно-элементная модель ПЭГ (рис. 4), адекватная физической модели, рассмотренной выше.

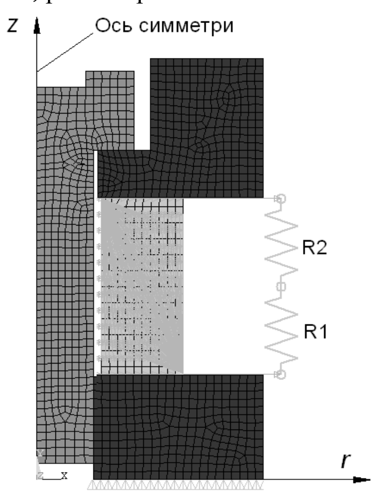


Рис. 4. Осесимметричная конечно-элементная модель ПЭГ с активной нагрузкой

На первом этапе было проведено численное исследование по выбору шага интегрирования по времени уравнений МКЭ по схеме Ньюмарка для нестационарной задачи, в результате которого он был выбран равным 0,2 мкс. При этом результаты зависимости выходного напряжения от времени близки к результатам физического эксперимента (рис. 3, кривые 1–3).

Далее была решена статическая задача для случая сжимающего усилия, воздействующего на ЧЭ ПЭГ равного 3,1 кН, в результате которого было получено значение выходного напряжения V_0, равное 722 В. Проведенная серия

нестационарных расчетов для различных значений величины R активной нагрузки при импульсном нагружении показала, что при возрастании R выходное напряжение стремится к форме напряжения для разомкнутой цепи, максимальное значение которого совпадает с V_0.

Далее были проведены расчеты в *ANSYS*, по результатам которых были получены зависимости выходного напряжения от времени с изменением сжимающей нагрузки на участке от 0 до 0,21 с. при R равном 0,374; 2,572 и 22,77 МОм. Результаты этих расчетов отражены на графике временной зависимости выходного напряжения, полученной из физического эксперимента (рис. 3). Сравнение результатов расчетов и эксперимента в этих случаях показывает достаточно хорошее их совпадение. Так как скорость нагружения ЧЭ ПЭГ достаточно мала по сравнению со скоростью упругих волновых процессов, то численное решение задачи соответствуют квазистатической постановке.

Следующий этап численного исследования связан с анализом частотной зависимости выходного напряжения ПЭГ при гармоническом возбуждении колебаний силой с амплитудой 3 кН. Эти расчеты показали, что при величине активного сопротивления 22 МОм и выше, значение выходного потенциала достигает некоторого предельного значения, начиная с частоты колебаний 0,2 Гц, в широком частотном диапазоне до первого резонанса.

Однако это не означает, что при этих значениях частоты и сопротивлении нагрузки можно на выходе достигнуть максимума выходной мощности ПЭГ. Авторами ранее было доказано, что зависимости выходного напряжения и выходной мощности от скорости механического нагружения существенно отличаются, во всяком случае в диапазоне скоростей до 4,1 кН/с [13]. Поэтому для более детального анализа этой особенности возникла необходимость расчета выходных характеристик ПЭГ в достаточно широком диапазоне скоростей нагружения. Ниже приведены результаты такого расчета с помощью аппроксимации нагрузки рядом Фурье на основе упрощённой электромеханической модели многослойного ПЭГ [14].

Предполагается, что генератор возбуждается осевым сжимающим нагружением $p(t)$ на частотах, гораздо меньших собственной резонансной частоты, что в свою очередь позволяет описать динамику системы с электромеханической связью уравнением первого порядка. Если к ПЭГ, состоящему из N слоев, поляризованных по толщине, параллельно подключено сопротивление нагрузки R, то определяющее уравнение, описывающие систему выглядит следующим образом

$$\sum_{i=1}^{N}\frac{d}{dt}\left(\int_{A_i}\cdot D\,n\,dA_i\right)=\frac{v(t)}{R}, \tag{1}$$

где $v(t)$ — напряжение на резисторе; D — вектор электрического смещения; n — вектор нормали поверхности электрода; A_i — площадь поверхности электрода i-го слоя. Представим вектор электрического смещения в виде:

$$D_i = d_{ijk}T_{ij} + \varepsilon_{ij}^{T}E_j. \tag{2}$$

Подставив (2) в (1), получим уравнение (3), описывающее динамику системы:

$$C_p^{eq}\dot{v}(t)+\frac{1}{R}v(t)=d_{33}^{eff}A\dot{p}(t), \tag{3}$$

$$C_p^{eq} = N\lambda\varepsilon_{33}^{T}A/h,$$

$$d_{33}^{eff} = N\mu d_{33},$$

где C_p^{eq} — эквивалентная емкость; h — толщина одного слоя ПЭГ; d_{33}^{eff} — эффективный пьезомодуль; λ и μ — эмпирические константы, введённые в силу различия между моноблочной и многослойной конфигурациями ПЭГ, а также эффектов, накладываемых технологией производства многослойных ПГ.

В случае, если нагружение обладает произвольной формой, как например, на рис. 3, то амплитудные значения механической нагрузки $p(t)$ можно представить набором дискретных значений, а затем интерполировать с помощью рядов Фурье:

$$p(t)\cong m_0+\sum_{k=1}^{N}\left[m_k\cos\left(k\frac{2\pi t}{T}\right)+n_k\sin\left(k\frac{2\pi t}{T}\right)\right], \tag{4}$$

где m_0 — среднее значение; T — длительность нагружения; m_k, n_k — коэффициенты Фурье:

$$m_0=\frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt,\quad m_k=\frac{2}{T}\int_0^T p(t)\cos\left(k\frac{2\pi t}{T}\right)dt,\quad n_k=\frac{2}{T}\int_0^T p(t)\sin\left(k\frac{2\pi t}{T}\right)dt. \tag{5}$$

Затем полученное приближение (4) можно подставить в уравнение (3) и решить численно, например, методом Рунге-Кутта. Результаты численного моделирования с использованием одномерной модели, приведённые на рис. 5, показали высокую сходимость с результатами КЭ расчета, приведённого на рис. 3, во всяком случае в диапазоне низких частот колебаний ПЭГ стековой конфигурации. Однако, объем вычислений в последнем случае меньше, чем при

конечно-элементном моделировании. При расчете зависимости выходного напряжения ПЭГ при частоте импульсного воздействия ниже 0,2 Гц и сопротивлении нагрузки до 22 МОм можно получить выходное напряжение не более 100 В. Однако, расчет выходной мощности ПЭГ при указанной выше скорости механического нагружения составляет всего 0.05 мВт в случае сопротивления нагрузке 22 МОм, а при сопротивлении 0.374 МОм можно достичь существенно большей выходной мощности, равно при прочих равных условиях 8 мВт.

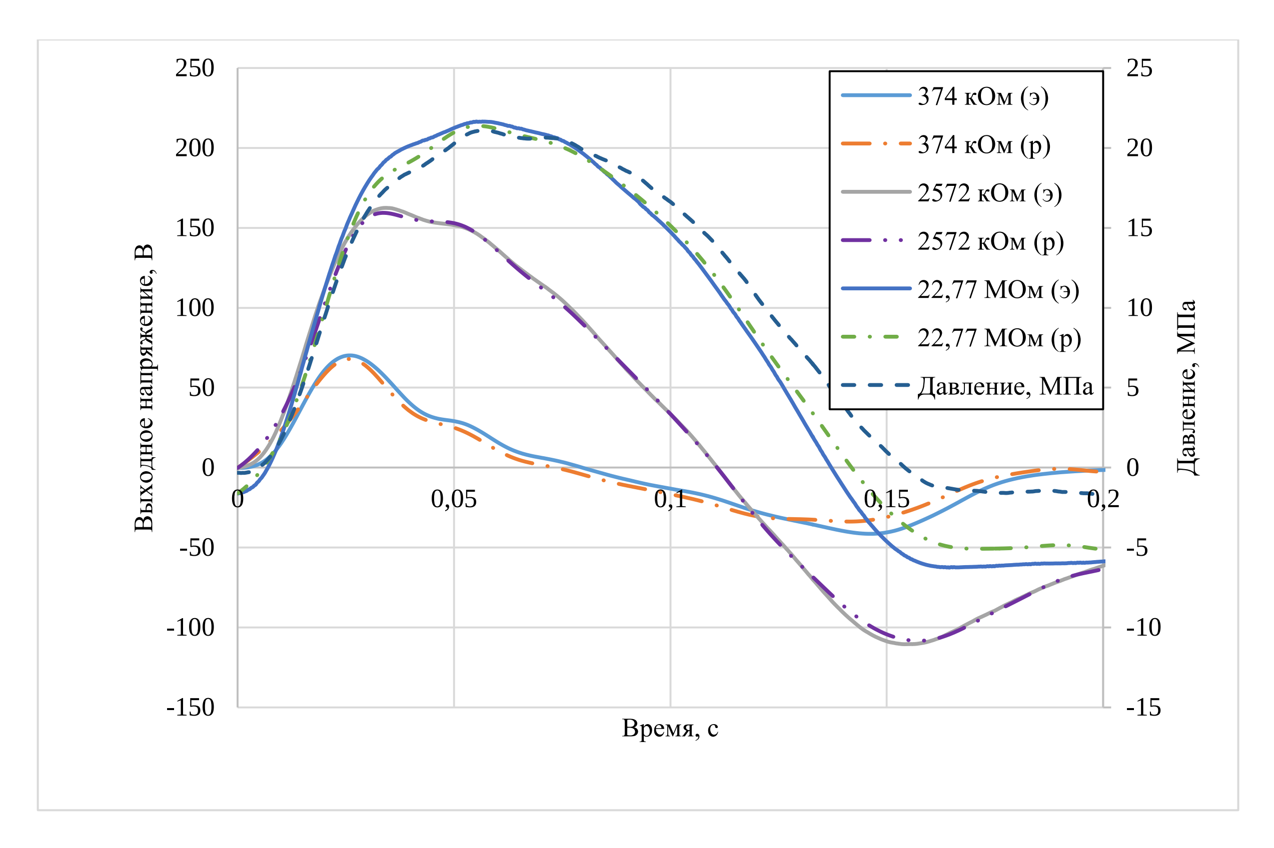


Рис. 5. Результаты численного расчета выходных характеристик ПЭГ с помощью аппроксимации механической нагрузки рядом Фурье: (э) — эксперимент, (р) — расчёт

Выводы.

1. Разработана методика и изготовлена лабораторная установка для проведения экспериментальных измерений параметров ПЭГ при их механическом импульсном нагружении.
2. Разработана конечно-элементная модель устройства в *ANSYS* и проанализирована аналитическая упрощенная одномерная модель.
3. Установлено, что временные зависимости воздействующего сжимающего механического импульса и соответствующих пьезоэлектрических откликов на выходе ПЭГ при различных значениях сопротивлениях нагрузки, полученные из физического эксперимента и численного, как конечно-элементного, так и аналитического расчета показывает достаточно хорошее их совпадение.
4. Сравнение форм сигналов пьезоэлектрического отклика при увеличении R (кривые 1, 2, 3 на рис. 3) и импульсов усилия сжатия (кривая 4, рис. 3) показало, что с ростом R формы выходного напряжения стремятся к форме возбуждающего импульса механического напряжения.
5. Показано, что режим неискаженной передачи пьезоэлектрического отклика ПЭГ стекового типа достигается при электрическом сопротивлении нагрузки выше 22 МОм для данного ПЭГ. Результаты КЭ расчета выходных характеристик ПЭГ исследованного типа подтвердили достоверность этого вывода.
6. Установлено, что частотная зависимость выходного напряжения ПЭГ осевого типа имеет сложный характер, зависящий как от уровня сжимающей импульсной нагрузки и величины пьезомодуля d_{33} материала чувствительного элемента ПЭГ, так и от электрического сопротивления нагрузки.

Библиографический список

1. Erturk, A. Piezoelectric energy harvesting / A. Erturk, D. J. Inman. — N. Y. : John Willey and Sons, Ltd., 2011. — 402 p.
2. Anton, S. R. Multifunctional Piezoelectric Energy Harvesting Concepts. PhD diss. to Virginia Polytechnic Institute and State University / S. R. Anton. — Blacksburg : Virginia, 2011. — 215 p.
3. Головнин, В. А.Сравнительные характеристики пьезокерамических механоэлектрических преобразователей для генерации электричества / В. А. Головнин [и др.] // Вестник Твер. гос. ун-та. Серия «Физика». — 2010. — № 11. — С. 33–46.
4. DuToit, N. E. Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters / N. E. DuToit, B. L. Wardle, S. G. Kim // Integrated Ferroelectrics. — 2005. — V. 71. — №. 1. — Pp. 121–160.
5. DuToit, N. E. Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters / N. E. DuToit, B. L. Wardle // AIAA journal. — 2007. — V. 45. — №. 5. — Pp. 1126–1137.
6. Adhikari, S. Piezoelectric energy harvesting from broadband random vibrations / S. Adhikari, M. I. Friswell, D. J Inman // Smart Materials and Structures. — 2009. V. 18. — №. 11. — P. 115005.
7. Roundy, S. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics / S. Roundy, P. K. Wright // Smart Materials and Structures. — 2004. — V. 13. — №. 5. — P. 1131.
8. Зыонг, Ле В. Конечно-элементный анализ применимости прикладных теорий расчета пьезоэлектрического устройства накопления энергии стековой конфигурации / Ле В. Зыонг // Инженерный вестник Дона. — 2014. — № 2. — С. 1–13.
9. Анализ стабильности электрофизических характеристик пьезокерамик различных составов, используемых для пьезоэлектрических генераторов кантилеверного типа повышенной мощности / В. А. Акопьян [и др.] // Нано- и микросистемная техника. — 2012. — № 1. — С. 37–41.
10. Многослойные пьезоэлектрические актуаторы и особенности их применения / В. К. Казаков [и др.] // Компоненты и технологии. — 2007. — № 6. — С. 62–65.
11. Гриценко, А. Состояние и перспективы развития пьезоэлектрических генераторов / А. Гриценко, В. Никифоров, Т. Щеголева // Компоненты и технологии. — 2012. — № 9. — С. 63–68.
12. Морозов, А. Г. Электротехника, электроника и импульсная техника / А. Г. Морозов. — Москва : Высшая школа, 1987. — 448 с.
13. Влияние вида механического нагружения на энергоэффективность пьезоэлектрических генераторов / В. А. Акопьян [и др.] // Нано- и микросистемная техника. — 2015. — № 2. — С. 33–44.
14. Zhao, S. Deterministic and band-limited stochastic energy harvesting from uniaxial excitation of a multilayer piezoelectric stack / S. Zhao, A. Erturk // Sensors and Actuators A : Physical. — 2014. — V. 214. — Pp. 58–65.

References

1. Erturk, A., Inman, D.J. Piezoelectric energy harvesting. N. Y.: John Willey and Sons, Ltd., 2011, 402 p.
2. Anton, S. R. Multifunctional Piezoelectric Energy Harvesting Concepts. PhD diss. to Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg: Virginia, 201, 215 p.
3. Golovin, V.A., et al. Sravnitel'nye kharakteristiki p'yezokeramicheskikh mekhanoelektricheskikh preobrazovateley dlya generatsii elektrichestva. [Comparative characteristics of piezoceramic mechanoelectric transducers for generation of electricity.] Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Fizika”, 2010, no. 11, pp. 33–46 (in Russian).
4. DuToit, N.E., Wardle, B.L., Kim S.G. Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters. Integrated Ferroelectrics, 2005, vol. 71, no. 1, pp. 121–160.
5. DuToit, N. E., Wardle, B.L. Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters. AIAA journal, 2007, vol. 45, no. 5, pp. 1126–1137.
6. Adhikari, S., Friswell, M.I., Inman, D.J. Piezoelectric energy harvesting from broadband random vibrations. Smart Materials and Structures, 2009, vol. 18, no. 11, pp. 115005.
7. Roundy, S., Wright, P. K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. Smart Materials and Structures, 2004, vol. 13, no. 5, pp. 1131.
8. Duong, Le V. Konechno-elementnyy analiz primenimosti prikladnykh teoriy rascheta p'yezoelektricheskogo ustroystva nakopleniya energii stekovoy konfiguratsii. [Finite element analysis of the applicability of the applied theories of calculation of piezoelectric device of energy storage of stack configuration.] Engineering Journal of Don, 2014, no. 2, pp. 1–13 (in Russian).
9. Akopyan, V.A., et al. Analiz stabil'nosti elektrofizicheskikh kharakteristik p'yezokeramik razlichnykh sostavov, ispol'zuemykh dlya p'yezoelektricheskikh generatorov kantilevernogo tipa povyshennoy moshchnosti. [Analysis of the Electro-Physical Characteristics Piezoceramics Different Composition Used for High Power Piezoelectric Generators.] Journal of Nano and Microsystem Technique, 2012, no. 1, pp. 37–41 (in Russian).

10. Kazakov, V.K., et al. Mnogosloynye p'yezoelektricheskie aktuatory i osobennosti ikh primeneniya. [Multilayer piezoelectric actuators and features of their application.] Components and Technologies, 2007, no. 6, pp. 62–65 (in Russian).

11. Gritsenko, A., Nikiforov, V., Shchegoleva, T. Sostoyanie i perspektivy razvitiya p'yezoelektricheskikh generatorov. [State and prospects of piezoelectric generators.] Components and Technologies, 2012, no. 9, pp. 63–68 (in Russian).

12. Morozov, A.G. Elektrotekhnika, elektronika i impul'snaya tekhnika. [Electrotechnics, Electronics and pulse Engineering.] Moscow: Vysshaya shkola, 1987, 448 p. (in Russian).

13. Akopyan, V.A., et al. Vliyanie vida mekhanicheskogo nagruzheniya na energoeffektivnost' p'yezoelektricheskikh generatorov. [Influence of the type of mechanical loading on the energy efficiency of the piezoelectric generators.] Journal of Nano and Microsystem Technique, 2015, no. 2, pp.C. 33–44 (in Russian).

14. Zhao, S., Erturk, A. Deterministic and band-limited stochastic energy harvesting from uniaxial excitation of a multilayer piezoelectric stack. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, vol. 214, pp. 58–65.

Поступила в редакцию 24.11.2015
Сдана в редакцию 25.11.2015
Запланирована в номер 22.01.2016